

Trabajo final de grado

## Grado en ingeniería en tecnologías industriales

### Estudio de una galga de retrodispersión de radiación gamma

**Autor:** Josué Eduardo Tello Guizado  
**Director:** Alfredo de Blas del Hoyo  
**Convocatoria:** julio 2019



Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial de Barcelona





---

## RESUMEN

El presente informe es un estudio sobre la optimización de la configuración de una galga inclinada de retrodispersión que es un sistema formado por un detector de centelleo 3"x3" de NaI, una fuente de radiación gamma,  $^{60}\text{Co}$  o  $^{137}\text{Cs}$  en este caso, para poder medir el espesor de diferentes muestras.

Las simulaciones con PENELOPE, que es un código de simulación de transporte de radiaciones ionizantes como los rayos gamma que está basado en métodos Monte Carlo, permite estudiar cual es la mejor configuración de las galgas, para llegar a esta se han hecho muchas simulaciones y con el análisis de las primeras simulaciones se decide nuevas configuraciones para conseguir el objetivo de optimizar la galga.

Para verificar que los resultados obtenidos con PENELOPE se asemejan a la realidad, primero se realiza una simulación básica de una fuente de  $^{60}\text{Co}$  y un detector de centelleo 3"x3" de NaI y posteriormente un experimento con los mismos elementos y configuración para verificar que el número de cuentas por segundo detectadas son iguales para ambas.

Además de encontrar la mejor configuración, se determina diferentes curvas de retrodispersión para distintos materiales (Al y Fe) y fuentes ( $^{60}\text{Co}$  o  $^{137}\text{Cs}$ ) para distintos tipos de galgas, y sus respectivos espesores de saturación. También se comprueban la relación entre número atómico y el número de cuentas netas de las partículas gamma.

Este trabajo contiene información sobre diferentes tipos de galgas (inclinadas y sin barrera), la teoría sobre la determinación de espesores de distintas muestras y como utilizar el programa PENELOPE.

Finalmente se realiza un presupuesto orientativo y un estudio de impacto ambiental de este proyecto.

# ÍNDICE

<b>1. GLOSARIO</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>8</b>
2.1. Origen del proyecto .....	8
2.2. Motivación .....	8
2.3. Requerimientos previos.....	8
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
3.1. Objetivos del proyecto .....	9
3.2 Alcance del proyecto.....	9
<b>4. INTERACCIÓN DE LOS FOTONES CON LA MATERIA</b>	<b>10</b>
4.1. Tipos de interacciones de los fotones con la materia.....	10
<b>5. DETECTOR DE RAYOS GAMMA</b>	<b>12</b>
<b>6. FORMA DE LOS ESPECTROS DE ENERGÍA</b>	<b>13</b>
<b>7. CÁLCULO DE CUENTAS</b>	<b>14</b>
<b>8. MEDIDA DE ESPESORES</b>	<b>16</b>
8.1 Tipos de galgas de rayos gamma. ....	16
8.1.1 Galgas de espesor de transmisión de rayos gamma. ....	16
8.1.2 Galgas de retrodispersión con rayos gamma.....	18
8.2 Posibles configuraciones de las galgas de retrodispersión . ....	18
<b>9. ELEMENTOS DE LA GALGA DE ESTUDIO</b>	<b>22</b>
<b>10. SIMULACIÓN CON MÉTODOS MONTE CARLO</b>	<b>24</b>
10.1 Pasos para realizar una simulación .....	24
<b>11. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL</b>	<b>28</b>
<b>12. SIMULACIÓN DE LA GALGA DE ESTUDIO</b>	<b>30</b>
12.1 Datos del sistema a simular .....	30
12.2 Determinación de la orientación óptima del detector .....	32
12.3 Análisis de los resultados .....	36
<b>13. DETERMINACIÓN DE LOS ESPESORES DE SATURACIÓN DEL ALUMINIO.</b>	<b>40</b>

<b>14. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN PARA DIFERENTES MUESTRAS.</b>	<b>43</b>
<b>15. PRESUPUESTO</b>	<b>45</b>
15.1 Costes asociados a recursos humanos.....	45
15.2 Costes de recursos materiales.....	45
15.3 Costes totales.....	46
<b>16. IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>47</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>48</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>50</b>
Referencias bibliográficas.....	50
Bibliografía complementaria .....	51



---

# 1. Glosario

**PENELOPE:** PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons.

**Método de Monte Carlo:** Método no determinista o estocástico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

**Retrodispersión:** Dispersión que tiene como resultado el retorno de una partícula del material a través de la misma superficie por la que entra.

**Espesor de saturación:** Espesor mínimo de un material que produce una retrodispersión que no se modifica en aumentar su grosor.

**FWHM** : Full Width Half Maximum , ancho de la altura media de cualquier pico ,principalmente de fotopicos , este parámetro está relacionado con la resolución del detector.

**Cps** cuentas por segundo

**Tallys:** cuentas en español, salen al principio del nombre del archivo de salida de PENELOPE.

**NRC** : Nuclear regulatory comission

**IAEA:** Regulations for the Safe Transport of Radiactive Material.

## **2. Prefacio**

### **2.1. Origen del proyecto**

El proyecto surge debido a que es necesario encontrar una configuración adecuada de una galga inclinada de retrodispersión y de esta manera poder recibir más cuentas y que la galga sea más sensible. para poder hacer mediciones de espesores de distintos materiales. La principal característica de este tipo de galgas se basa en la medida de espesores sin contacto físico, lo que hace que este método sea especialmente útil en muchas aplicaciones.

Se ha demostrado que los sistemas que utilizan radiaciones ionizantes presentan algunas ventajas respecto a otros métodos, ya que resuelve algunos problemas de medición que de otra manera sería físicamente imposible medir, además presentan una mayor precisión.

### **2.2. Motivación**

El siguiente proyecto está motivado por la búsqueda de una configuración óptima de una galga de retrodispersión inclinada ya que en la actualidad esta información es escasa y que es de gran importancia para hacer este tipo de mediciones.

Otra motivación de este proyecto es la de verificar fenómenos como asociados al número de partículas dispersadas dependiendo del material de las muestras a medir, y las relaciones del espesor de saturación y energía de la fuente, mediante las simulaciones con PENELOPE.

### **2.3. Requerimientos previos**

Para realizar un estudio de estas características hace falta conocimientos básicos de física nuclear, y conocimientos básicos sobre códigos de simulación del transporte de partículas.



## 3. Introducción

### 3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este estudio entre otros es la de mejorar una galga de retrodispersión inclinada para medir espesores de diversos materiales, haciéndola más sensible, para ello se ha de obtener información sobre cuál es la mejor configuración de sus componentes (detector, fuente, muestra), en este caso se variará la posición de un detector cilíndrico de centelleo 3"x3" de NaI, las fuentes que se usan que emiten radiación gamma ( $^{137}\text{Cs}$  o  $^{60}\text{Co}$ ) y la muestra de Al se mantendrán en una posición fija, el criterio para determinar la mejor configuración se basa en el número de cuentas netas de partículas retrodispersadas que llegan al detector. Para lograr este objetivo se realizarán diversas simulaciones con PENELOPE.

Además, otro objetivo del presente trabajo es el de comprobar mediante simulación los fenómenos experimentales como la relación entre número atómico y número de cuentas para una galga sin barrera, la comprobación se llevará a cabo con muestras de aluminio y hierro, y una muestra de  $^{60}\text{Co}$  con PENELOPE.

El último objetivo consiste en encontrar la relación entre espesor de saturación en una muestra de aluminio y distintas energías de una galga inclinada de retrodispersión, para ello se utilizan fuentes de  $^{137}\text{Cs}$  o  $^{60}\text{Co}$ , utilizando PENELOPE.

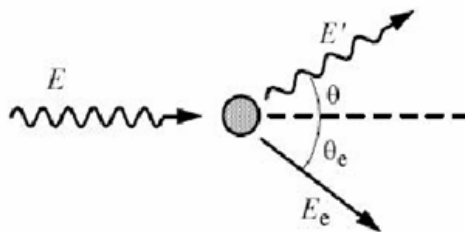
### 3.2 Alcance del proyecto

El alcance del proyecto incluye el estudio de una galga de retrodispersión para medir espesores de recubrimientos de diferentes tipos de materiales a partir de un determinado espesor dado que las fuentes utilizadas son de alta energía. Para simular la geometría de la galga con PENELOPE se ha considerado diferentes simplificaciones, como por ejemplo no tener en cuenta el envoltorio de las fuentes, ni la capa de óxido de aluminio del detector.

## 4. Interacción de los fotones con la materia

### 4.1. Tipos de interacciones de los fotones con la materia

- EFECTO COMPTON. -El fotón incidente interacciona con un electrón de manera inelástica, este es desviado con un ángulo  $\theta$  respecto a su dirección original y parte de esta energía se transfiere al electrón que se libera con un ángulo  $\theta_e$  respecto la dirección original del fotón incidente. [1]



**Figura 4.1:** Efecto Compton [6]

Fórmula del fotón dispersado (4.1)

$$E\gamma' = \frac{E\gamma}{1 + \frac{E\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (4.1)$$

- $E\gamma'$ , energía del fotón dispersado

- $E\gamma$ , energía de fotón inicial

- $m_e$ , masa de un electrón en reposo.

Fórmula energía electrón liberado (4.2)

$$E_{Kin} = E_{\gamma} - E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_e c^2}{(1 - \cos \theta)}} \quad (4.2)$$

-EFECTO FOTOELÉCTRICO. - Este efecto tiene lugar cuando un fotón gamma interacciona con un electrón orbital que sale disparado con una parte de energía transferida del fotón gamma, esta energía es la diferencia entre la energía del fotón y la energía de enlace del electrón (4.3). [1]

$$E_{kin} = E_{\gamma} - E_{enlace} \quad (4.3)$$

-PRODUCCIÓN DE PARES. -Un fotón gamma se convierte en un par electrón-positrón, este efecto solo es posible si los fotones incidentes son superiores a 1022KeV, la energía en exceso de la producción de pares se reparte entre el positrón y el electrón, el positrón al interaccionar con otro electrón, crea dos fotones de 511 KeV. [1]

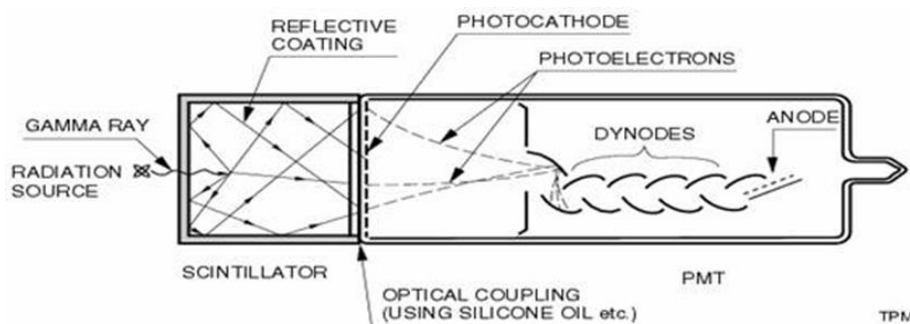
## 5. Detector de rayos gamma

El detector adecuado para detectar rayos gamma, son los de centelleo que han constituido uno de los dispositivos más ampliamente utilizados en la detección de radiación nuclear. Existen diversos tipos de detectores de centelleo, entre ellos se encuentran los orgánicos e inorgánicos, en este trabajo se utiliza este último hecho de NaI.

El principio de funcionamiento del detector de centelleo (figura 5.1) se basa en una propiedad llamada luminiscencia, se trata poner un material dentro del detector en el cual al recibir una partícula radiactiva como las partículas gamma dicho material emite fotones de centelleo que es proporcional a la energía de la partícula detectada. Estos fotones pasan por el fotocátodo en donde se arrancan electrones, estos fotoelectrones serán multiplicados en los dínodos del tubo fotomultiplicador, que tienen un potencial más elevado a medida que van avanzando, de manera que el número de electrones arrancados va aumentando hasta que llega al ánodo y se procesa en otro módulo que será capaz de diferenciar las diferentes energías de los fotones.

Los detectores de centelleo se caracterizan por:

- Una respuesta en tiempos muy rápida, lo que es útil cuando se miden tasas altas de llegadas de impulsos.
- Buena linealidad en energía dentro de un amplio intervalo.
- Buena sensibilidad a la radiación, mucho mayor que en otros detectores como los de ionización gaseosa.
- Pobre resolución en energías. El rendimiento luminoso en los detectores de centelleo es bastante bajo, ya que los fotones producidos al cual se encuentra ligado el poder de resolución es pequeño, el principio de funcionamiento del fotomultiplicador también contribuye a la falta de resolución [12]



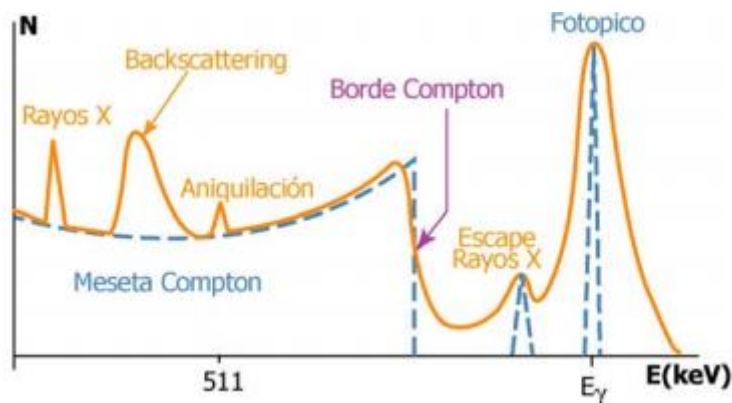
**Figura 5.1** Esquema de detector de centelleo [7]

## 6.Forma de los espectros de energía

El espectro de energías refleja las interacciones de los fotones con el detector. Dependiendo del tipo de detector se obtendrán distintas formas de espectro, por ejemplo si se utiliza un detector grande los fotones que entran en el detector no podrán escapar ,por lo tanto el espectro hallado es el de un fotopico( figura 6.1) .En el caso de un detector mediano el espectro será distinto debido al escape de múltiples fotones , la figura 6.2 muestra el espectro de energías detectado de una fuente que emite rayos gamma, la línea naranja representa el espectro con dispersión, y el espectro de energías ideal es la línea azul. El borde Compton es debido al efecto Compton, el fotopico se detecta por el efecto fotoeléctrico, el pico de retrodispersión (backscattering) aparece por las partículas gamma debidas al efecto Compton que tienen lugar alrededor del detector y se llegan a detectar también. Este espectro también está influenciado por efectos debidos a ruido electrónico.



**Figura 6.1:** Espectro ideal obtenido con un detector grande. [10]

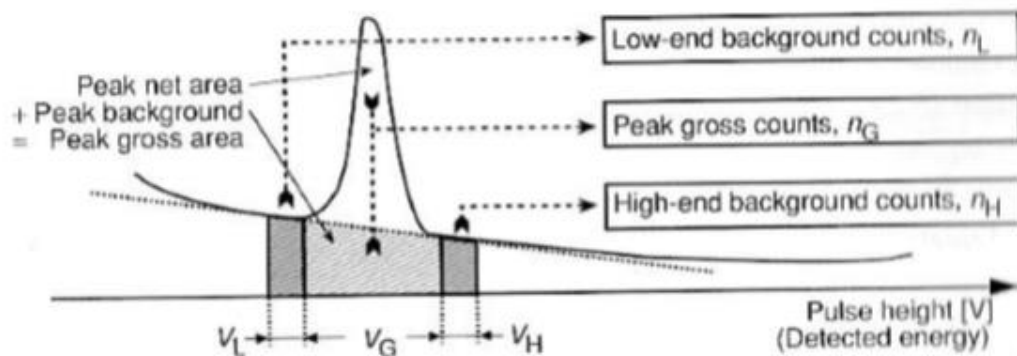


**Figura 6.2:** Espectro de un detector teniendo en cuenta efectos debidos al entorno del detector. [11]

## 7.Cálculo de cuentas

El cálculo de cuentas por segundo (cps) del fotopico o zona de interés se ha de hacer teniendo en cuenta las cuentas debidas al efecto Compton continuo dentro del propio detector, lo que hace que el número de cuentas aumente, es por ello que se debe aplicar una corrección, para así pasa de cuentas brutas a netas.

El método de Cowell sirve para obtener las cuentas netas de un pico, esto es discriminar las cuentas de fondo, las cuentas netas son obtenidas con la fórmula (7.3), es posible determinar la desviación estándar mediante la fórmula (7.4)



**Figura 7.1:** Representación de la distribución de las cuentas.[15]

$$n_B = \left( \frac{n_L}{V_L} + \frac{n_H}{V_H} \right) \frac{V_L}{2} \quad (7.1)$$

$$V_L = V_H$$

$$n_B = \frac{1}{2} (n_L + n_H) \frac{V_G}{V_H} \quad (7.2)$$

$$n_N = n_G - \frac{1}{2} (n_L + n_H) \frac{V_G}{V_L} \quad (7.3)$$

$$\sigma = \sqrt{n_N + n_B \left( 1 + \frac{V_G}{2V_L} \right)} \quad (7.4)$$

$n_B$  =Cuentas de fondo del pico expresado en cps.

$n_H$  = Cuentas de fondo de la parte superior de la cola del pico expresado en cps

$n_L$  = Cuentas de fondo de la parte inferior de la cola del pico expresado en cps.

$n_G$  = Cuentas netas del pico expresado en cps.

$V_L$  = Rango inferior asociado a las cuentas de fondo inferior expresado en KeV

$V_H$  = Rango superior asociado a las cuentas de fondo superior expresado en KeV.

$V_G$  = Rango asociado a las cuentas netas expresado en KeV.

## 8. Medida de espesores

Las galgas de radioisótopos son muy utilizadas en la industria para controlar el espesor de materiales laminares desde plásticos hasta acero, incluso el estado de corrosión de tubos.

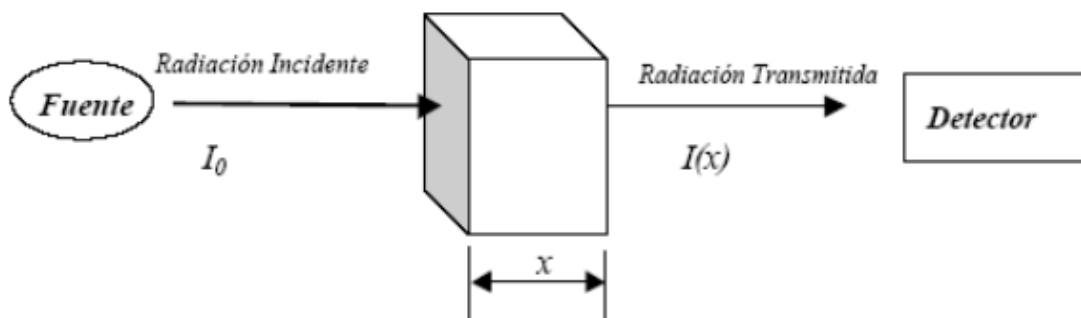
Los componentes generales de estas galgas son el detector, la fuente y la muestra de la que se mide un parámetro.

Las galgas de radioisótopos pueden utilizarse con diferentes partículas como por ejemplo las partículas beta y gamma, en este trabajo se estudia las galgas de rayos gamma.

### 8.1 Tipos de galgas de rayos gamma.

#### 8.1.1 Galgas de espesor de transmisión de rayos gamma.

Los rayos gamma se utilizan para medir el espesor de una muestra cuya densidad se conoce, utilizando la fórmula de la ley de atenuación, ya que los que son transmitidos son proporcionales a las propiedades de la muestra



**Figura 8.1:** Esquema del dispositivo experimental para medir espesores

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x_m} \quad (8.1)$$

$I_0$ =intensidad de fotones sin ninguna muestra



$I(x)$ =intensidad de fotones con muestra en la distancia  $x$

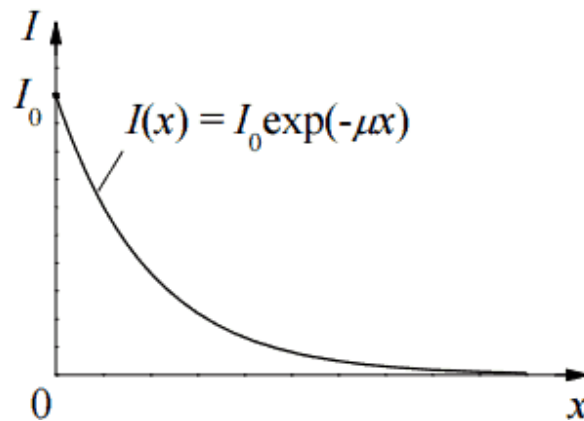
$\mu$ =coeficiente de atenuación másico( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$x$ =espesor de la muestra. (cm)

$\rho$ =densidad( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$x_m = x\rho$

El coeficiente de atenuación se puede encontrar por calibración con una muestra de espesor conocido.



**Figura 8.2:** Ley exponencial de atenuación de los fotones

Dependiendo de la energía del fotón de la fuente utilizada, es posible medir diferentes espesores y en consecuencia tener diferentes usos en la industria, en este trabajo se utilizan los fotones de alta energía.

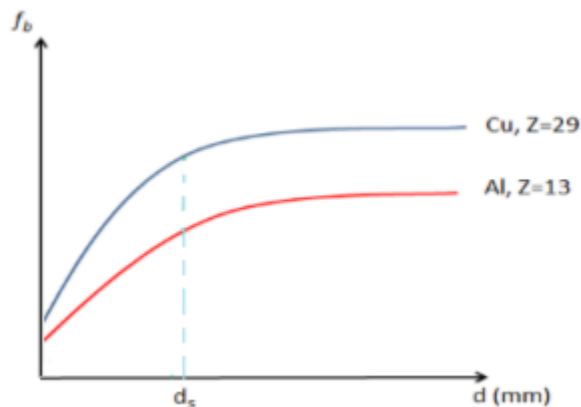
Los materiales a medir con los fotones de alta energía son espesores de metales (estáticas y dinámicas), tablas de madera, cartones, alimentos, capas de nieve y de depósitos de agua, carbón en minas, paredes de tuberías, tubos [2].

### 8.1.2 Galgas de retrodispersión con rayos gamma.

Las galgas de retrodispersión son galgas en donde las partículas gamma que llegan a las muestras cambian de dirección y de esta manera llegan al detector, estas se pueden utilizar para medir láminas como ya se ha mencionado, sin embargo, esta técnica es menos utilizada que las otras, pero a pesar de su poco uso, en muchos casos sería muy difícil obtener información de otra manera o imposible.

La radiación dispersada en la muestra está cuantitativamente relacionada con propiedades del material, la figura 8.3 muestra que el ratio de cuentas de los rayos gamma dispersados  $180^\circ$  para rayos gamma de muestras de cobre y aluminio depende del espesor y de la densidad de los materiales. [3]

El ratio de fotones dispersados tiene un límite para cada material a partir de un espesor, por lo tanto, este ratio se mantendrá constante a partir del espesor de saturación, este espesor limita el rango de medidas posibles (figura 8.3).

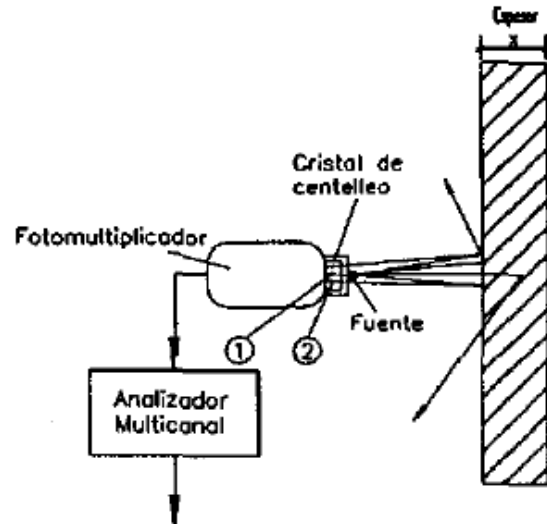


**Figura 8.3:** Esquema de ratio de cuentas según el espesor de cada muestra

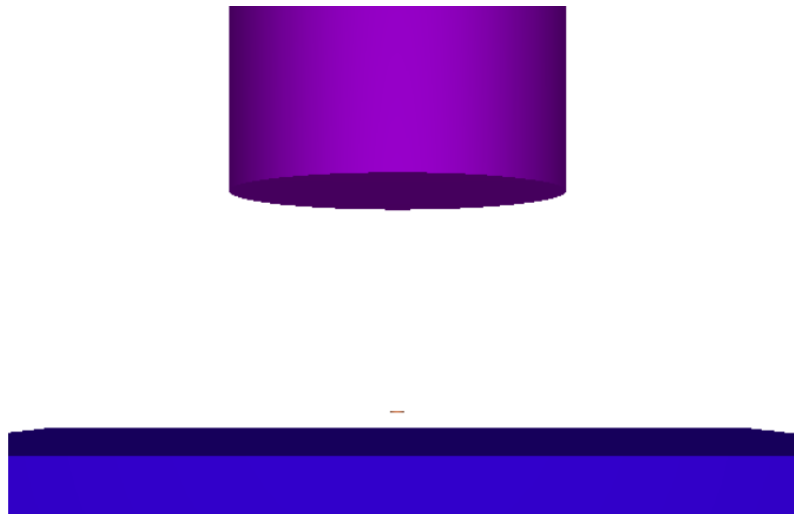
## 8.2 Posibles configuraciones de las galgas de retrodispersión .

Es posible construir un sistema sin barreras o vertical en donde las partículas llegan directamente a la muestra y son dispersados hacia distintas direcciones haciendo posible que vuelvan al detector con distintas energías (figura 8.4).

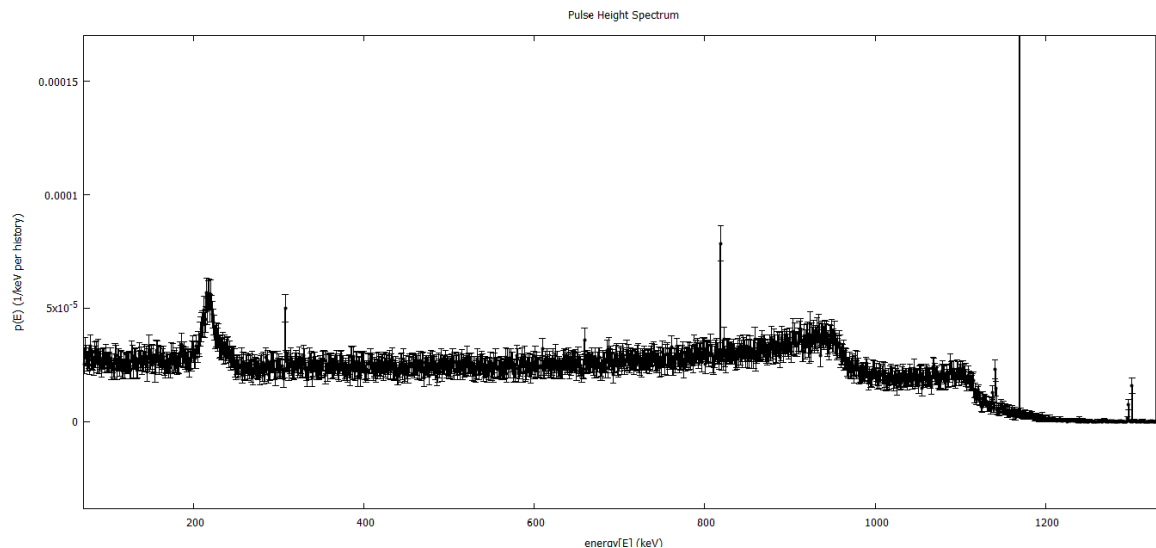
Los fotones retrodispersados tienen una energía menor que la radiación primaria por ejemplo para el  $^{60}\text{Co}$  la radiación primaria de 1.3 MeV, las partículas dispersadas tendrán una energía de 200KeV.



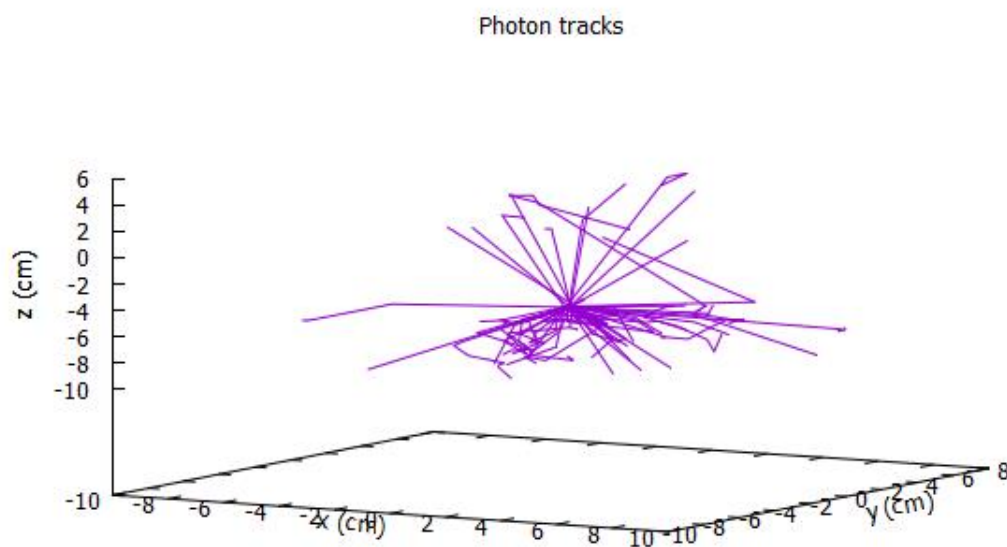
**Figura 8.4:** Galga sin barrera o vertical. [8]



**Figura 8.5:** Esquema galga sin barrera para simulación, detector(violeta), azul(muestra) y entre ambos la fuente.



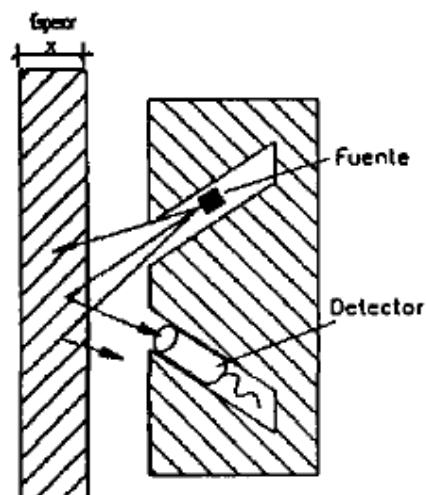
**Figura 8.6** Espectro de energía depositada para galga sin barrera, con fuente  $^{60}\text{Co}$  sin FWHM.



**Figura 8.7** Trayectoria de los fotones que salen de la fuente.

Alternativamente se puede realizar **una galga inclinada**, el funcionamiento es el mismo, las partículas dispersadas llegan al detector y de esta manera se puede saber el espesor.

La ventaja de utilizar este tipo de galgas es que se puede medir desde un solo lado de la muestra, es decir que el detector y la muestra están en el mismo lado [4].



**Figura 8.8:** Galga de retrodispersión inclinado [8]

Con este método se pueden medir espesores de paredes de depósitos y tuberías, medida de espesores de recubrimientos sobre metales (pintura, incrustaciones de carbonato cálcico en las calderas.) y espesores de carbón en minerías.

Radionucleido	Periodo (años)	Radiaciones emitidas	Intervalo útil		
			mm de Al	mm de Fe	Espeso Másico[mg/cm <sup>2</sup> ]
Co-60	5.3	1.33 MeV(100%)  1.17 MeV(100%)	40-400	15-200	$10^4$ - $1.5 \cdot 10^5$
Cs-137	30	0.66MeV (92%)	20-250	6-60	$5 \cdot 10^3$ - $6 \cdot 10^4$

**Tabla 8.9:** Radionucleidos comunes empleados y intervalos de medición de muestras de Al y Fe [5].

## 9.Elementos de la galga de estudio

En el presente trabajo se realizará el estudio de galgas de retrodispersión gamma inclinadas y en otro caso una sin barrera, sin embargo, en ambos casos se utilizarán la misma forma de la fuente, aunque son de distintos elementos, y la galga inclinada necesitará un colimador, estos elementos entre otros se detallara a continuación.

-Fuentes:  $^{60}\text{Co}$ , que libera dos fotones de energía 1.17MeV y 1.33MeV por cada desintegración y  $^{137}\text{Cs}$  con, ambas con la misma geometría (figura 9.1).

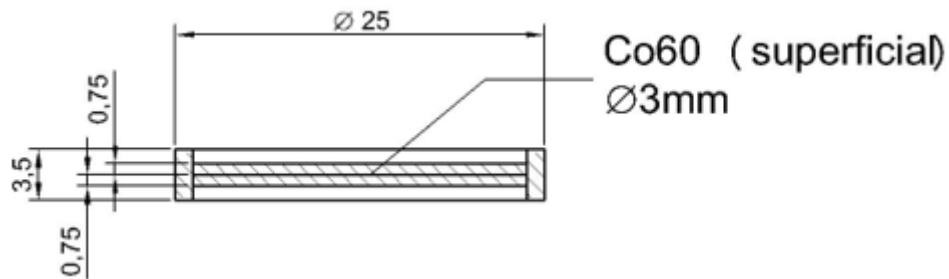


Figura 9.1: Esquema de las fuentes usadas.

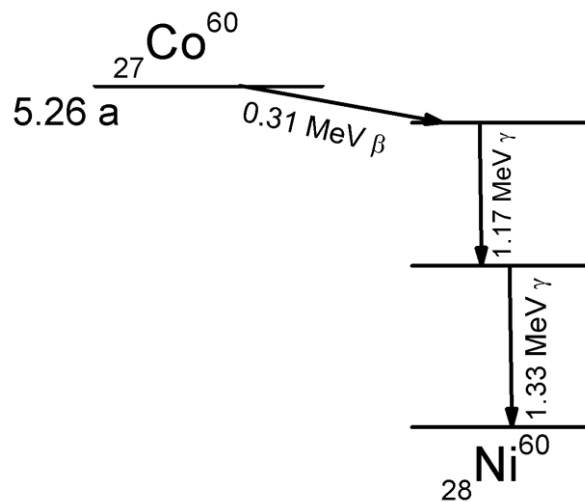


Figura 9.2: Esquema de desintegración  $^{60}\text{Co}$  [9]

-Muestra: láminas cilíndricas de diversos espesores, de aluminio y en otro estudio hierro.

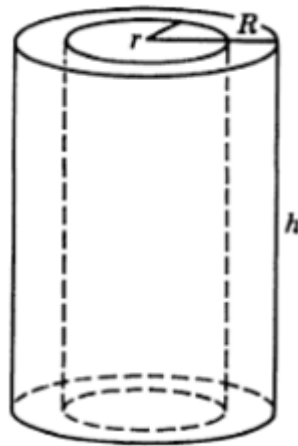
-Detector: detector 3"x3" de NaI: cilindro con altura 3 pulgadas y radio 1.5 pulgadas (figura 10.1).

-Colimador. - El colimador sirve para que solo lleguen a la muestra rayos gammas en una dirección determinada, el material del colimador en todos los casos es de plomo.

R: Radio exterior del colimador.

r: Radio interior del colimador.

h: Altura del colimador.



**Figura 9.3:** Esquema colimador utilizado.

## 10. Simulación con métodos Monte Carlo

La simulación con el método Monte Carlo es utilizado usualmente en la ingeniería nuclear, dosimetría, radioterapia, y en el diseño de sistemas de medidas como los diferentes tipos de galgas existentes. El método consiste en simular la vida de las partículas lo cual incluye las trayectorias de las partículas y sus interacciones. Finalmente hace la media de todos los datos recogidos para diversos historiales, por lo tanto, mientras más partículas o historias se simulen menor será el error de los valores medios encontrados.

Las simulaciones con métodos Monte Carlo y los métodos experimentales son complementarios, ya que se de esta manera se comprueba que la simulación es correcta.

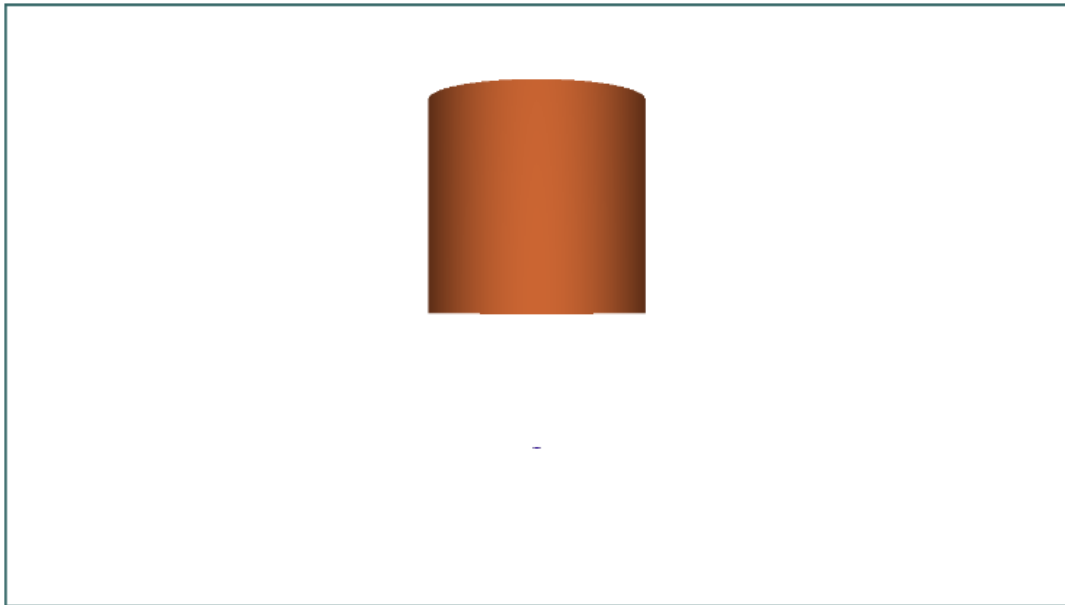
Los códigos de simulación Monte Carlo contienen en general cuatro componentes relevantes, la interface de definición de la geometría, los datos de la sección eficaz para todos los procesos llevado a cabo en la simulación, los algoritmos utilizados para el transporte de radiación y la interface de análisis de la información obtenida al final de la simulación. En este caso utilizaremos el programa PENELOPE para hacer las simulaciones.

### 10.1 Pasos para realizar una simulación

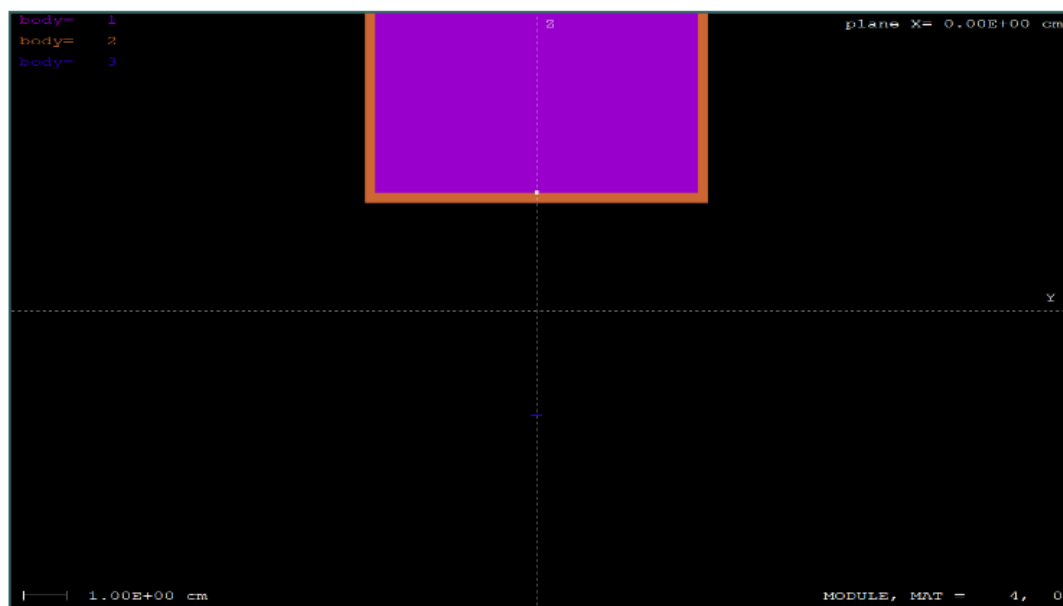
Para llevar a cabo las simulaciones hacen falta diferentes archivos con la descripción del sistema; archivo principal de entrada de datos y comandos o input (peneasy.in), archivo con la descripción de la geometría del sistema y archivo con las propiedades de los diferentes materiales que aparecen. Después de introducir los archivos de entrada se procede a simular, una vez finalizada la simulación se obtienen los archivos de salida o tallys , en este trabajo los archivos de salida de interés tienen el nombre de TallyPulseHeightSpectrum.

Para realizar la simulación primero se crea la geometría del sistema, en el cual se ha de enumerar los diferentes tipos de materiales existentes y los diferentes cuerpos existentes en el sistema creados (figura 10.1) declarados en el archivo de entrada de geometría.





**Figura 10.1:** Detector 3"x 3" de NaI y fuente de  $^{60}\text{Co}$ .



**Figura 10.2:** Detector 3"x3" de NaI con una fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

El segundo paso consiste en definir los parámetros relacionados con la fuente, en este caso se configura el archivo de entrada o input (peneasy.in) de manera que se simulen fotones en 'subsection for particle position' (figura 10.3), además de configurar los datos asociados al espacio geométrico por donde han de pasar las partículas que dependiendo de cada caso se dejará que salgan en todas las direcciones o solo en una zona del espacio 'subsection for particle direction' (figura 10.3) y también se declara la energía de los fotones 'subsection for particle energy' (figura 10.3).

```
# >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
# INSTRUCTIONS FOR SOURCE SECTIONS
#
# * Details on the features and configuration of each source model are
#   provided with their documentation (see ~/documentation/*).
# Notice that there must be one and only one active (status ON) source model.

[SECTION SOURCE BOX ISOTROPIC GAUSS SPECTRUM v.2014-12-21]
ON                                STATUS (ON or OFF)
2                                PARTICLE TYPE (1=ELECTRON, 2=PHOTON, 3=POSITRON)
SUBSECTION FOR PHOTON POLARIZATION:
0                                ACTIVATE PHOTON POLARIZATION PHYSICS (0=NO, 1=YES)
0.0 0.0 0.0                    STOKES PARAMETERS (UNUSED IF ACTIVATE POLARIZATION=0)
SUBSECTION FOR PARTICLE POSITION:
0.0 0.0 -5.245                  COORDINATES (cm) OF BOX CENTER
0.35 0.35 0.1                  BOX SIDES (cm)
0.0 0.0                        FWHMs (cm) OF GAUSSIAN X,Y DISTRIBUTIONS
0.0 0.0 0.0                    EULER ANGLES [OMEGA,THETA,PHI](deg) FOR BOX ROTATION Rz(PHI).Ry(THETA).Rz(OMEGA).r
0.0 0.0 0.0                    TRANSLATION [DX,DY,DZ](cm) OF BOX CENTER POSITION
3                                SOURCE MATERIAL (0=DON'T CARE, >0 FOR LOCAL SOURCE, <0 FOR IN-FIELD BEAM)
SUBSECTION FOR PARTICLE DIRECTION:
0.0 0.0 1.0                     DIRECTION VECTOR; NO NEED TO NORMALIZE
0.0 180.0                       DIRECTION POLAR ANGLE INTERVAL [THETA0,THETA1], BOTH VALUES IN [0,180]deg
0.0 360.0                       DIRECTION AZIMUTHAL ANGLE INTERVAL PHI0 IN [0,360]deg AND DeltaPHI IN [0,360]deg
1                                APPLY ALSO TO DIRECTION THE ROTATION USED FOR BOX POSITION (0=NO, 1=YES)
SUBSECTION FOR PARTICLE ENERGY:
-                                ENERGY SPECTRUM FILE NAME; ENTER '-' TO ENTER SPECTRUM IN NEXT LINES
Energy(eV) Probability          DUMMY SPECTRUM HEADER LINE; REMOVE HEADER AND TABLE IF A FILENAME WAS PROVIDED ABOVE
1.17e6 99.97                   1st channel: [1.17,1.17] MeV with prob ~ 99.97
1.17e6 0.0                     2nd channel: [1.17,1.33] MeV, no emissions
1.33e6 99.99                   3rd channel: [1.33,1.33] MeV with prob ~ 99.99
1.33e6 -1                      A negative value signals the end of the spectrum
0.0                             FWHM(eV) OF GAUSSIAN ENERGY DISTRIB. [NOTE FWHM=SIGMA*sqrt(8*ln(2))]
```

**Figura 10.3:** archivo peneasy.in, configuración de la fuente.

Se ha de asignar un material a cada uno de las partes de la geometría del sistema en el archivo de entrada (peneasy.in) y que de esta manera se tenga en cuenta las características de los materiales (figura 10.4).

El tiempo de simulación se puede reducir poniendo una energía límite para electrones  $E_{abs}(e^-)$ , y fotones  $E_{abs}(Ph)$  a partir de la cual se deja de simular las historias de las partículas secundarias (figura 10.4) .

```
[SECTION PENELOPE v.2009-10-01]
MAT# FILE____(max 20 char) EABS(e-) EABS(ph) EABS(e+) C1 C2 WCC WCR DSMAX COMMENTS
1 mat253.mat 8.00e3 1.0e3 8.00e3 0.1 0.1 1.000e3 1.000e3 1.0e30 yoduroSodio
2 mat106.mat 8.00e3 1.0e3 8.00e3 0.1 0.1 1.000e3 1.000e3 1.0e30 AlO
3 mat027.mat 8.00e3 1.0e3 8.00e3 0.1 0.1 1.000e3 1.000e3 1.0e30 cobalto
0 (SET MAT=0 TO END LIST)
[END OF PEN SECTION]
```

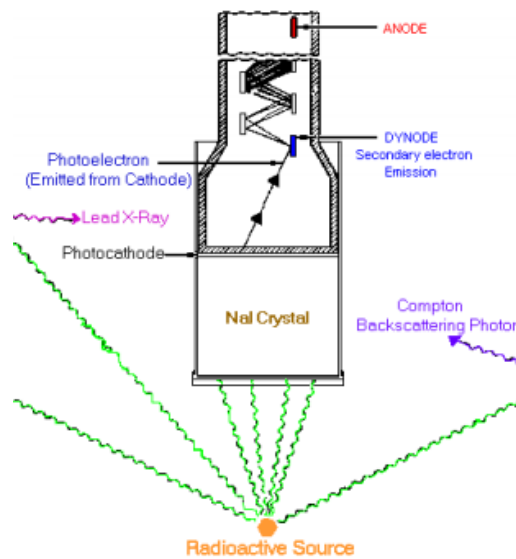
**Figura 10.4:** Configuración de los materiales y parámetros de corte.

El tercer paso es la simulación de las partículas, cada fotón producirá diversos fotones secundarios o electrones por ejemplo fluorescencia, fotones dispersados, fotones por aniquilación, fotoelectrones, el código de simulación procesará la historia de estos, y mientras más historias se simulen menor será el error estadístico, esto se puede modificar en el archivo de entrada, 'instructions for section configuration' en 'number of histories' (figura 10.5).



## 11.Simulación y validación experimental

Antes de realizar el estudio de la galga objetivo , se realiza una simulación simple para determinar como de efectiva es la simulación respecto a los resultados experimentales, la geometría del sistema está compuesto por una fuente de  $^{60}\text{Co}$  y por un detector de centelleo cilíndrico de NaI 3"x3" con un recubrimiento de óxido de aluminio, la fuente radiactiva se considera superficial, con superficie circular de diámetro 3 mm (figura11.1), y se encuentra a 5 cm del detector.



**Figura 11.1:** Esquema de fuente(naranja) y detector.

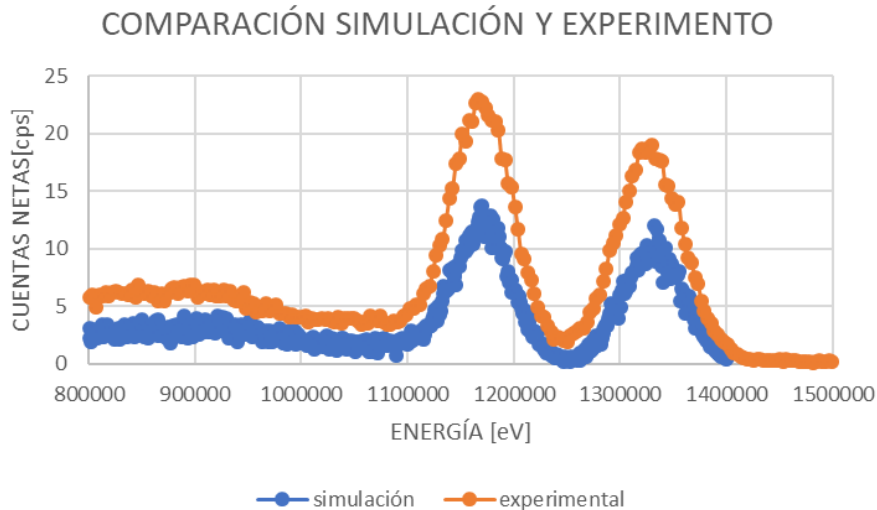
Siguiendo los pasos de la simulación y haciendo simplificaciones como por ejemplo quitar el óxido de aluminio y la cubierta de la fuente, se procede a verificar los resultados de la simulación, comparando el número de cuentas por segundo de cada pico de rayos gamma del  $^{60}\text{Co}$  (tabla 11.2). El cálculo de cuentas simuladas se encuentra en el anexo D.

Energías $^{60}\text{Co}$ [MeV]	CPS simulación	CPS experimental
1.17	382.83	422.92
1.33	345.87	386.67

**Tabla 11.2:** Tabla de comparación de valores de cps para la simulación y cuentas experimentales.

Para poder comparar ambos espectros de energía detectada, se hace una calibración por energía con los datos experimentales ,además de esta manera será posible obtener la recta FWHM (full width half maximum) frente a las energías ,con estos datos será posible hacer una mejor comparación, dado que es el FWHM el parámetro que refleja el fenómeno

de dispersión de la energía causada por los dispositivos electrónicos del detector, los parámetros de la reta FWHM se introducen en el archivo de entrada peneasy.in en 'section tally pulse height spectrum', donde  $A=5.3 \cdot 10^8$  y  $B=3180.98$  en la ecuación 10.1.



**Figura 11.3:** Comparación de espectro experimental y la simulación.

Las diferencias encontradas (figura 11.3) se deben a que las cuentas experimentales tienen en cuenta la radiación de fondo, además el sistema experimental tiene más cuerpos a su alrededor que el sistema simulado, lo que hará variar el espectro de retrodispersión, además de las inexactitudes de la distancia entre la fuente y el detector, y la inexactitud de las medidas reales de la fuente de cobalto.

El experimento se lleva a cabo con los siguientes instrumentos:

- Detector NaI
- HV power supply 3012.
- Amplificador (Voltage-sensitive amplifier )- Canberra (2022) .
- Preamplificador CANBERRA 2007P
- Analizador multicanal -(Trump-Ortec-PCI-MCA)
- Emulador de un MCA (analiador multicanal), Maestro.

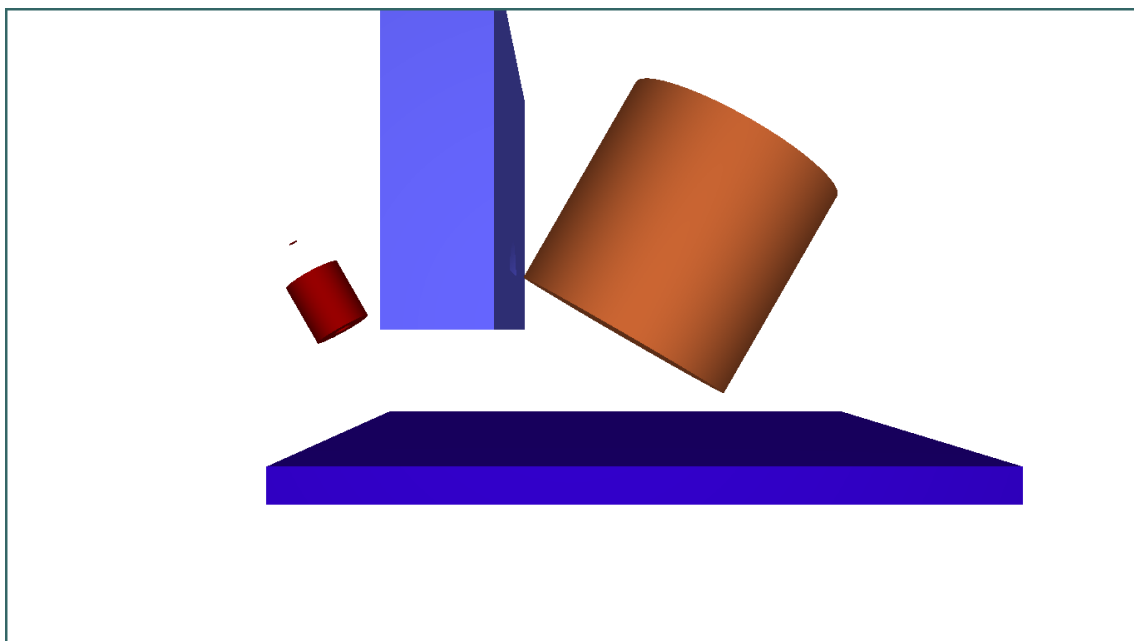
El procedimiento consiste en conectar la fuente de voltaje a los dispositivos electrónicos para poder detectar las emisiones de rayos gamma mediante el preamplificador y el amplificador que hacen posible detectar los pulsos de corriente que se registraran en el analizador multicanal y que se visualiza con el programa Maestro.

## 12.Simulación de la galga de estudio

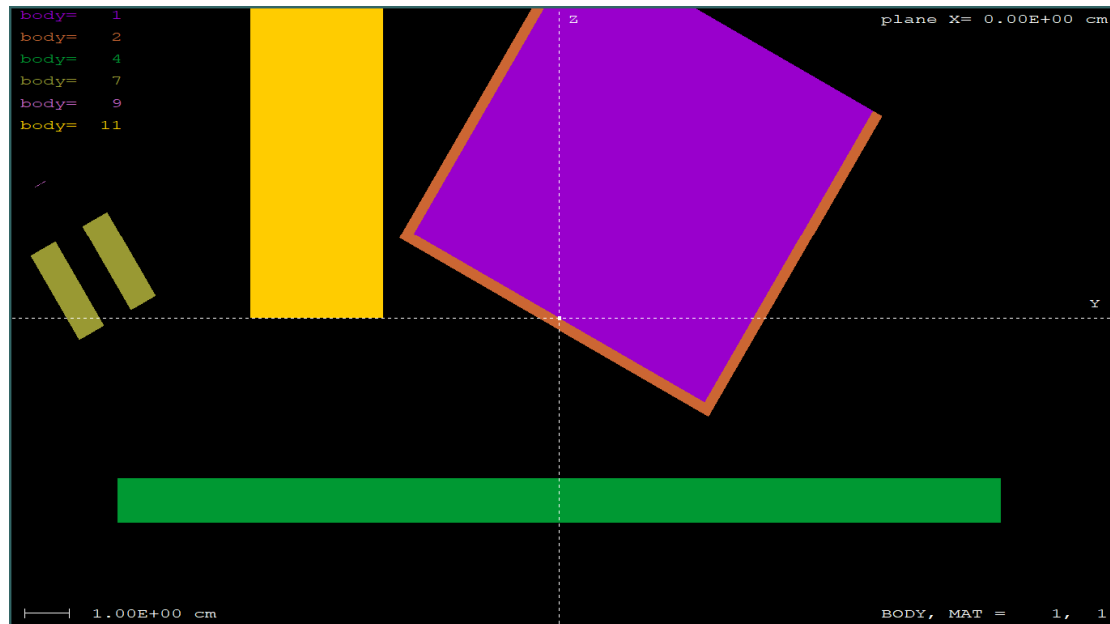
### 12.1 Datos del sistema a simular

Para realizar la simulación primero se crea la geometría del sistema con , en el que en la mejor configuración se tendría en cuenta, el colimador (rojo), el detector NaI 3"x 3"(naranja) con recubrimiento de óxido de aluminio  $Al_2O_3$ , una muestra a medir (azul oscuro), una barrera de plomo(azul claro) para impedir que las partículas lleguen directamente al detector sin ser dispersadas y finalmente la fuente (violeta) colocada encima del colimador, en este caso la fuente es superficial y circular ,todos estos cuerpos están representados en la figura 12.1 en tres dimensiones , también es posible ver el corte de la sección frontal en la figura 12.2 .

Como se verá más adelante modelo mostrado está bastante detallado y hará falta hacer simplificaciones para reducir el tiempo de simulación, cabe destacar que para cada tipo de estudio se detallan en una lista todos los cuerpos que se utilizarán en las respectivas simulaciones.



**Figura 12.1:** Geometría de la galga de estudio detallada, con barrera de plomo.

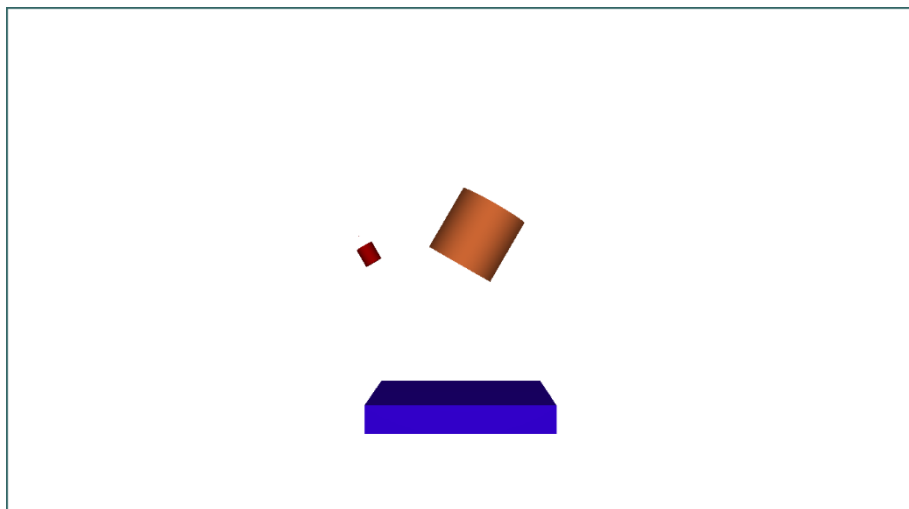


**Figura 12.2:** Esquema del sistema en dos dimensiones

El siguiente paso consiste en definir los parámetros relacionados con la fuente, para lo cual se configura el archivo Peneasy.in donde se indica el espacio por donde pasarán los fotones, donde está la fuente, posicionar la fuente de  $^{137}\text{Cs}$ , que tendrá la misma característica que la fuente de  $^{60}\text{Co}$  en otras simulaciones mostrada en la figura 9.1.

Para reducir el tiempo de simulación y poder encontrar el pico de retrodispersión, se configura un rayo colimado ideal, es decir los rayos solo tienen una dirección, que es la dirección normal al plano de la base de la fuente (figura A.4 del anexo A).

Además, se elimina la barrera de plomo para reducir tiempo y además quitar la cubierta del detector de óxido de aluminio, y se elimina el envoltorio de la fuente como se muestra en la figura 12.3, con todas estas simplificaciones se procederá a hacer el estudio.



**Figura 12.3:** Geometría del sistema **simplificado**, detector(naranja), muestra (azul), fuente (rojo)

## 12.2 Determinación de la orientación óptima del detector

La sensibilidad de la galga está determinada por el número de cuentas que llegan, mientras más cuentas lleguen, mejor podremos diferenciar espesores similares, por lo tanto, es importante encontrar la mejor orientación del detector, en el presente trabajo se varía la orientación del detector como se muestra en la figura 12.5.

La dirección de los rayos gamma simulados se configura de manera que sea única ya que para que lleguen más cuentas exclusivamente por retrodispersión, la dirección del rayo es la normal del plano de la base de la fuente. La geometría simulada se detalla en la figura 12.4 y en el anexo A un plano detalle de la fuente ( figura A.9).

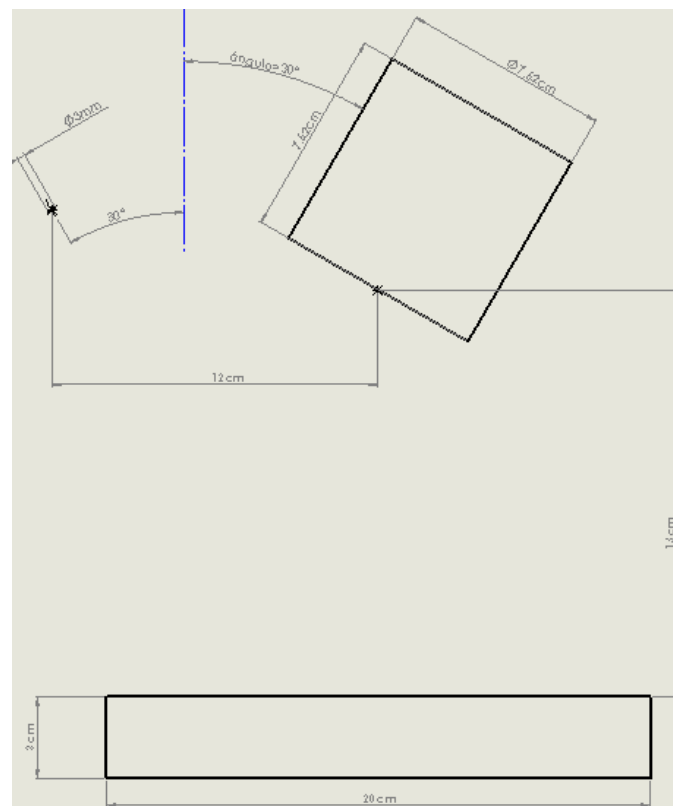
Los elementos de la galga son:

-Detector NaI 3"x 3"

-Fuente de  $^{137}\text{Cs}$  superficial de 3mm de diámetro,  $A_{\text{cesio}}=183.9 \text{ KBq}$ .

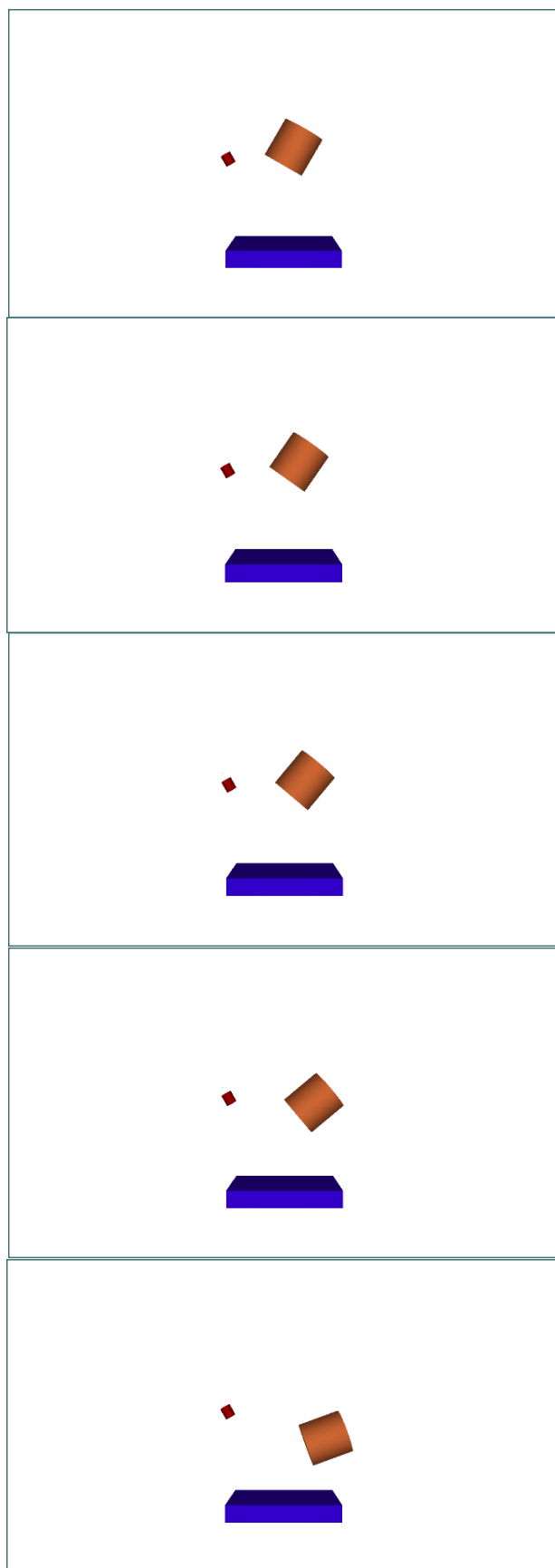
La muestra es de Fe de base cuadrada 20cm x 20 cm x 3cm.

El colimador no se utiliza dado que se usa el programa para colimar el rayo en la dirección del eje longitudinal de la fuente.



**Figura 12.4:** Plano sistema galga para una orientación del detector de  $30^\circ$ .





**Figura 12.5:** Variación de la orientación del detector (naranja).

Los resultados encontrados para las simulaciones descritas anteriormente, se detallan en la tabla 12.6, los parámetros de la tabla son los referidos a las fórmulas asociadas al método de Cowell (7.1), (7.2), (7.3), (7.4) para encontrar las cuentas netas y sus errores 12.7.

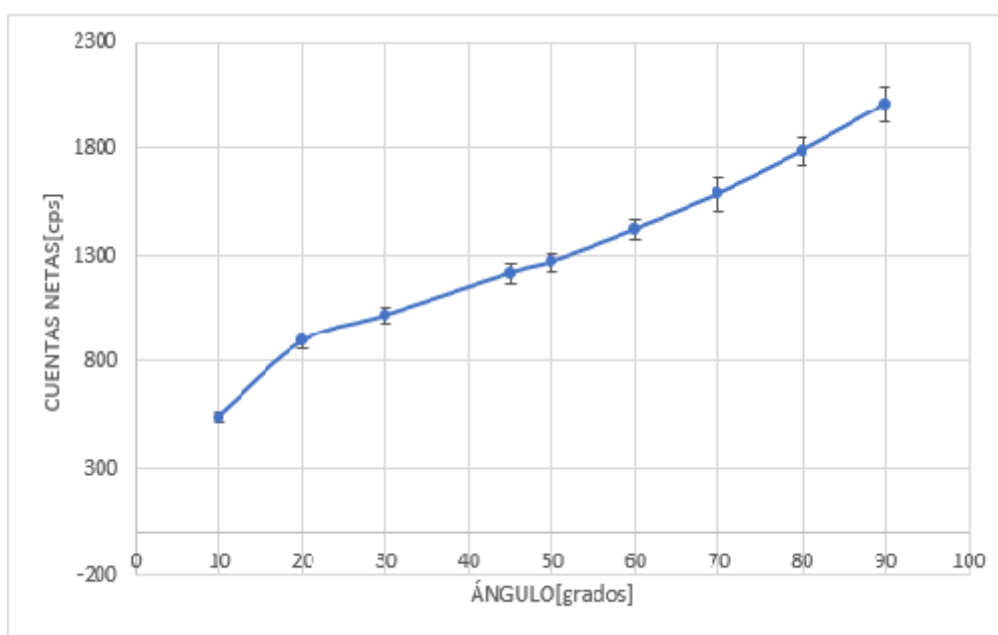
Los resultados se muestran gráficamente en la figura 12.8, donde se muestra las cuentas netas por segundo frente al ángulo.

Ángulo [grados]	Inicio intervalo Vg [KeV]	Final intervalo Vg [KeV]	$n_l$ [cps]	$n_H$ [cps]	$V_G$ [KeV]	$n_G$ [cps]	$V_L/V_H$ [KeV]
10	100	240	23.73	9.86	140	595.59	40.87
20	65	273	10.24	1.54	210	967.18	16.75
30	70	270	26.70	5.89	200	1106.52	36.85
45	70	299	18.037	2.59	229	1323.13	22.11
50	70	306	34.81	3.99	236	1402.89	34.17
60	74	325	29.94	2.93	251	1590.40	24.12
70	71	348	11.72	1.55	277	1834.47	7.37
80	69	380	11.21	0.94	311	2096.02	6.03
90	72	405	29.25	2.12	333	2378.91	14.07

**Tabla 12.6:** Valor de los parámetros de la ecuación.

ÁNGULO [grados]	$n_N$ [cps]	$\sigma$ [cps]
10	538.056	26.35
20	893.32	37.39
30	1018.088	36.77
45	1216.32	44.75
50	1268.89	43.065
60	1419.39	49.49
70	1585.095	78.44
80	1782.67	62.46
90	2007.76	80.61

**Tabla 12.7:** Valores de cuentas por segundo netas detectadas para cada ángulo



**Figura 12.8:** Cuentas por segundos para cada ángulo

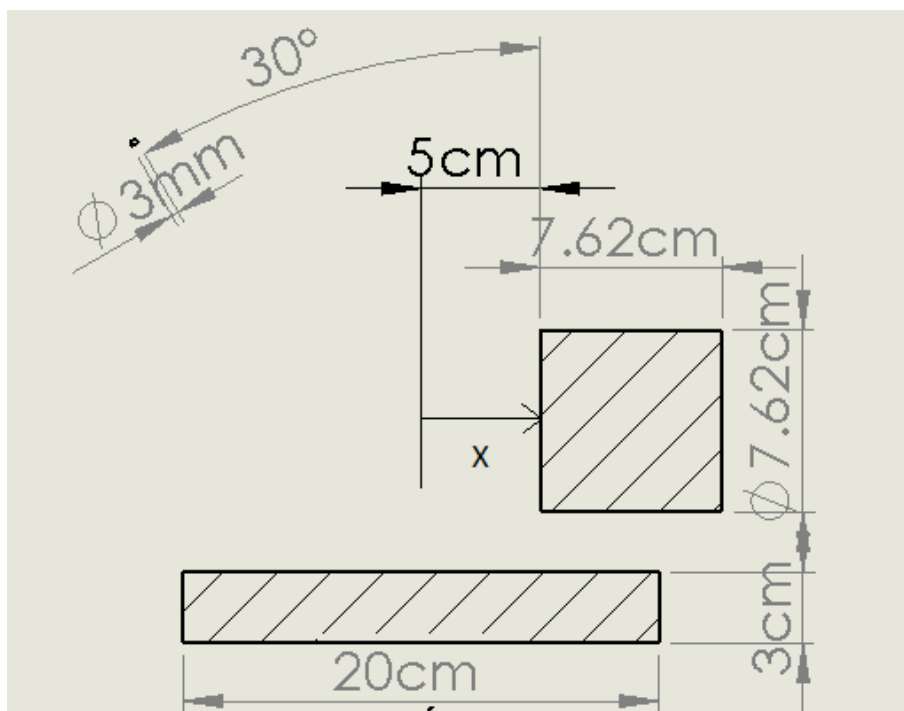
## 12.3 Análisis de los resultados

El análisis de los resultados muestra que existe una cantidad más alta de cuentas de partículas dispersadas a medida que el ángulo aumenta como se muestra en la figura 12.8, por lo tanto, para un ángulo de 90 grados las cuentas son más altas.

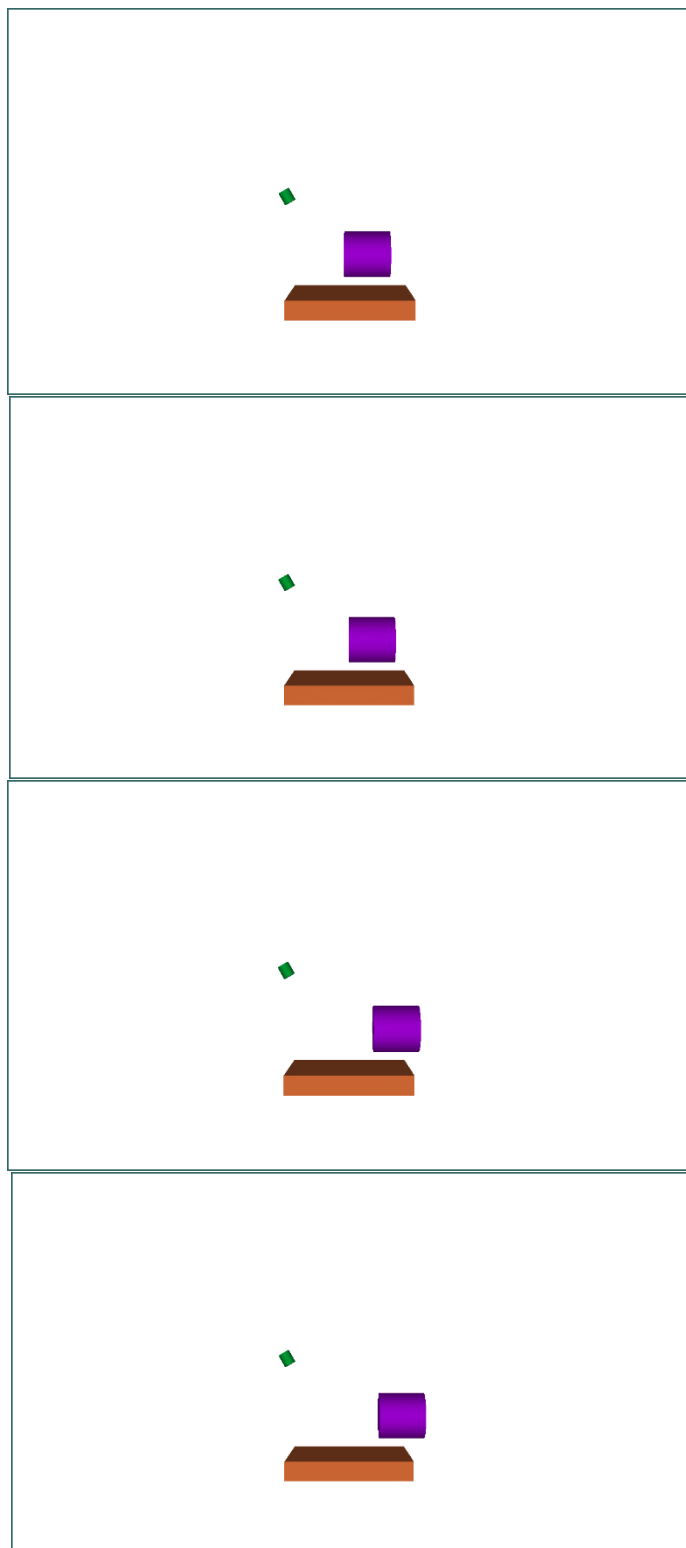
Para optimizar aún más el número de cuentas detectadas, se moverá el detector de manera horizontal desde un ángulo de 90 grados como se muestra en la figura 12.10, para encontrar donde se encuentra la posición más conveniente, la figura 12.9 muestra el plano del sistema galga que no incluye un colimador por que el rayo se colimará con el programa.

Una vez acabadas las simulaciones se encuentran las variables de las ecuaciones del método de Cowell en la tabla 12.11, con estos parámetros se encontrarán tanto la media de las cuentas netas como sus errores tabla 12.12. La tendencia de las cuentas frente a la variación de la distancia  $x$  (figura 12.13) muestra que mientras más cerca se encuentre el detector del rayo colimado más cuentas llegarán al este y por lo tanto la galga será más óptima.

También se comprueba que los datos obtenidos de esta simulación muestran la misma tendencia que para una fuente de  $^{60}\text{Co}$ , Los datos de simulación con una fuente de  $^{60}\text{Co}$  se mostrarán en el anexo A, además del plano detalle de la fuente.



**Figura12.9:** Esquema acotado del sistema galga 90°.



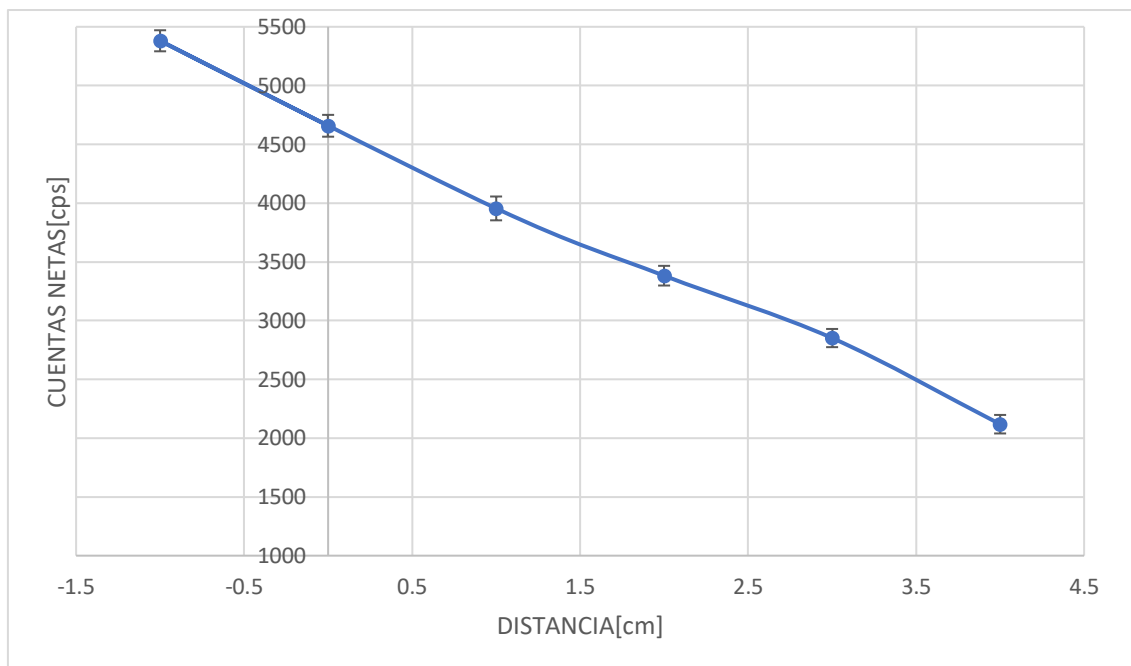
**Figura 12.10:** Variación horizontal del detector(violeta).

Y	Inicio intervalo  Vg [KeV]	Final intervalo  Vg [KeV]	V <sub>G</sub> [KeV]	V <sub>L</sub> /V <sub>H</sub> [KeV]	n <sub>G</sub> [cps]	n <sub>I</sub> [cps]	n <sub>H</sub> [cps]
0	73	370	297	35.72	5298.24	147.52	6.51
1	75	372	297	35.72	4566.67	123.72	8.13
-1	73	372	299	35.72	6115.45	152.026	5.15
2	73	372	299	35.72	3927.97	106.019	10.74
3	73	372	299	35.72	3322.87	88.95	11.91
4	77	372	295	35.72	2738.83	74.96	59.56

**Tabla 12.11:** Parámetros de las fórmulas para el cálculo de cuentas netas.

Y	n <sub>N</sub>	σ [cps]
0	4657.86	92.74
1	3954.78	89.54
-1	5381.12	101.39
2	3382.46	83.79
3	2851.66	77.43
4	2118.73	78.85

**Tabla 12.12:** Resultado de cuentas brutas y netas y errores para distintas distancias.



**Figura12.13:** Gráfico cuentas netas frente a **distancia (x)** a la que se encuentra el detector.

## 13.Determinación de los espesores de saturación del aluminio.

Para determinar el espesor de saturación del aluminio para diferentes fuentes, en este caso  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ , se parte de la mejor configuración encontrada en el apartado anterior para el detector y además se cambia posición de la fuente y se introduce un colimador (figura 13.1). Una simplificación para esta simulación es la limitación del espacio por donde pasarán las partículas de la fuente, que es un cono con ángulo de semiapertura de 10 grados

Los elementos de la galga son:

-Detector NaI 3"x 3"

-Fuente de  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$  superficial de 3mm de diámetro,  $A_{\text{COBALTO}} = A_{\text{CESIO}} = 183.9 \text{ KBq}$

-Colimador (figura 13.4) de parámetros:

$R = 1.0 \text{ cm}$

$r = 0.15 \text{ cm}$

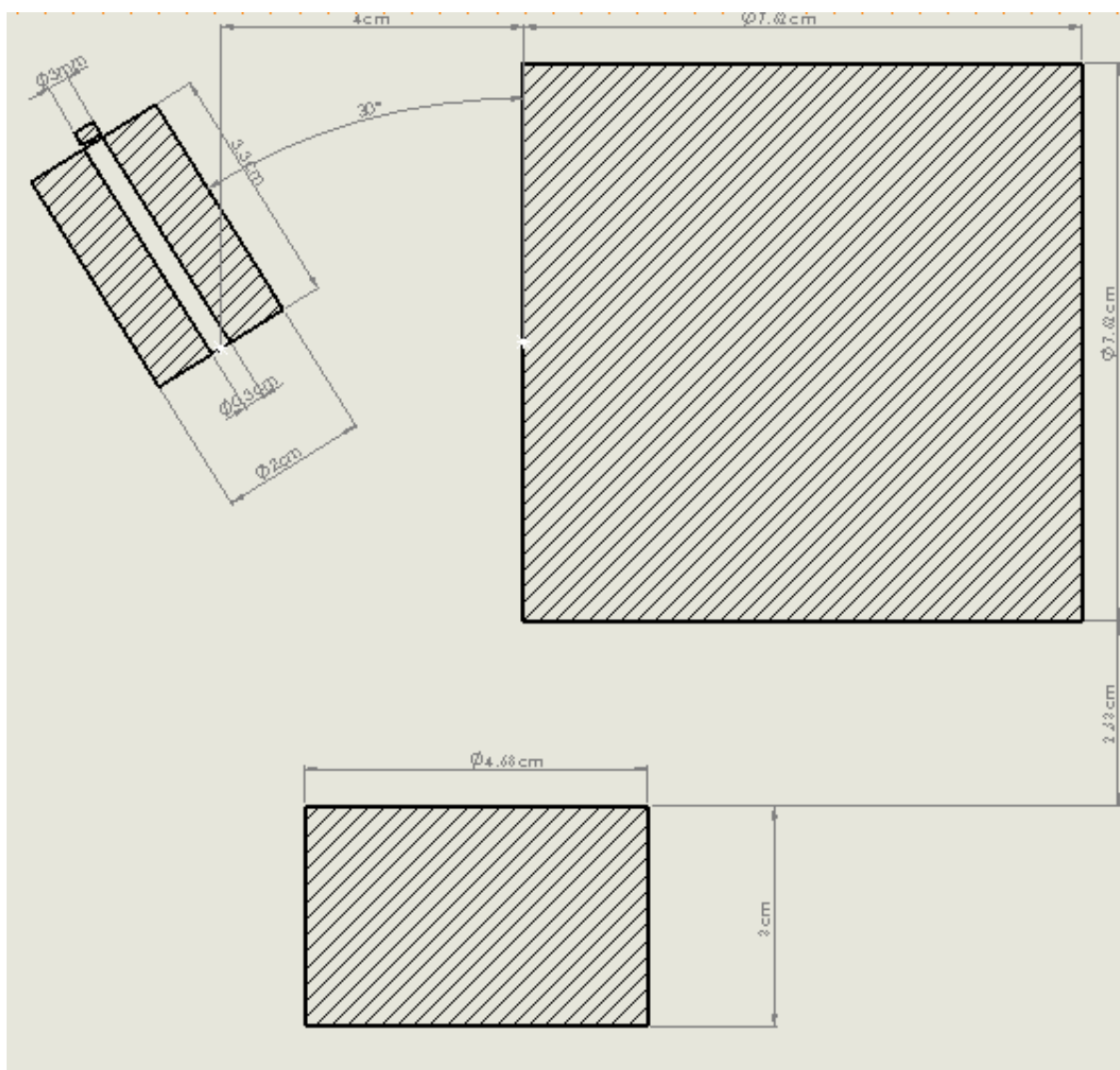
$h = 3.3 \text{ cm}$

Las muestras de Al de espesor variable de base circular de diámetro  $D = 4.68 \text{ cm}$  y espesor variable. La distancia mínima entre la fuente y el colimador es de 2 mm.

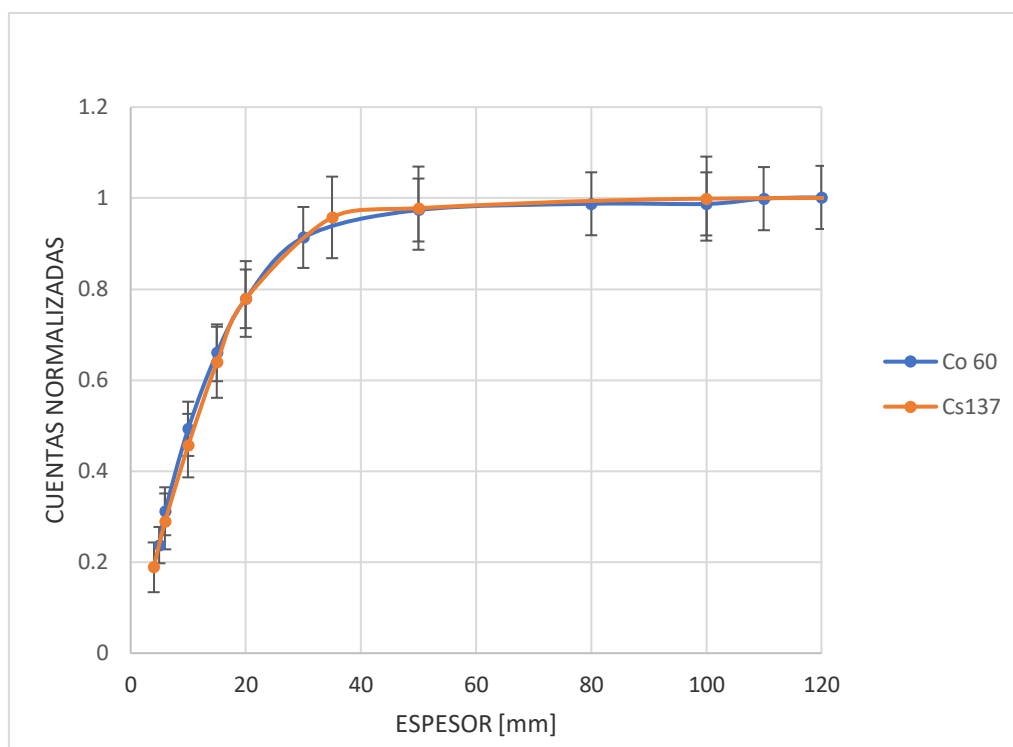
Una vez hechas las simulaciones se determinan los parámetros necesarios para calcular las cuentas netas (anexo B) y de esta manera encontrar las curvas de dispersión.

El resultado de la curva de dispersión frente al espesor para ambas fuentes se muestra en la figura 13.2, en donde las cuentas netas por segundo se encuentran normalizadas por la cuenta de espesor de saturación respectivos, con esta curva se determina el espesor de saturación del aluminio para cada fuente (tabla 13.3).





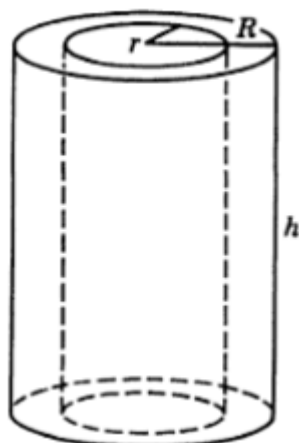
**Figura 13.1:** Esquema del sistema simulado óptimo.



**Figura 13.2:** Comparación curvas de dispersión normalizadas para una muestra de aluminio

	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
Espesor de saturación	102.5 mm	113.5 mm

**Tabla 13.3:** Espesores de saturación de una muestra del aluminio para diferentes fuentes.



**Figura 13.4:** Colimador utilizado.

## 14.Determinación de las curvas de dispersión para diferentes muestras.

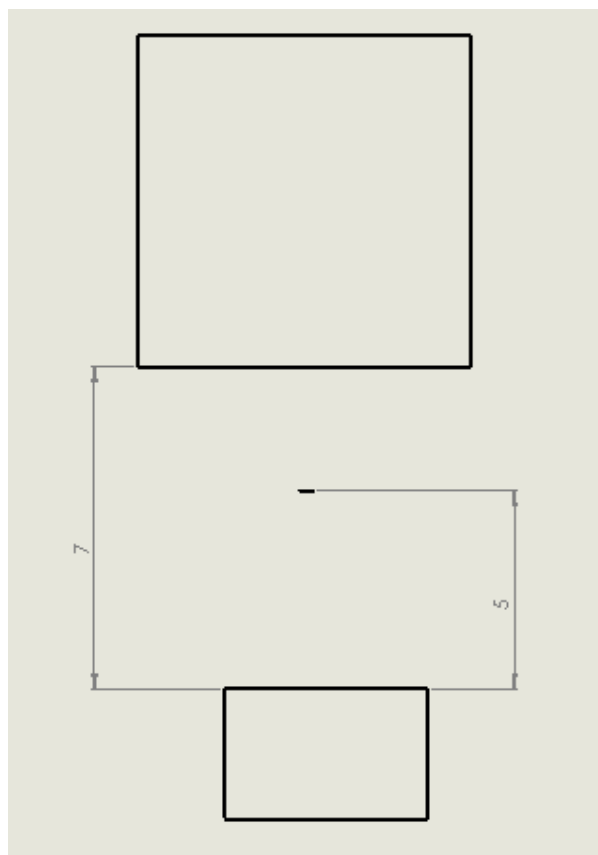
Para observar el fenómeno de variación de cuentas debido a las diferentes densidades de los materiales, se analizan los resultados de la simulación de una galga sin barrera (figura 14.1), cuyas muestras serán de hierro y aluminio, los resultados numéricos se encuentran en el anexo C y en la figura 14.2 se muestra las diferentes curvas de dispersión. Analizando los datos se encuentra que dado que el hierro tiene una mayor densidad, el número de cuentas detectadas será mayor que en el caso del aluminio.

Los elementos de la galga son:

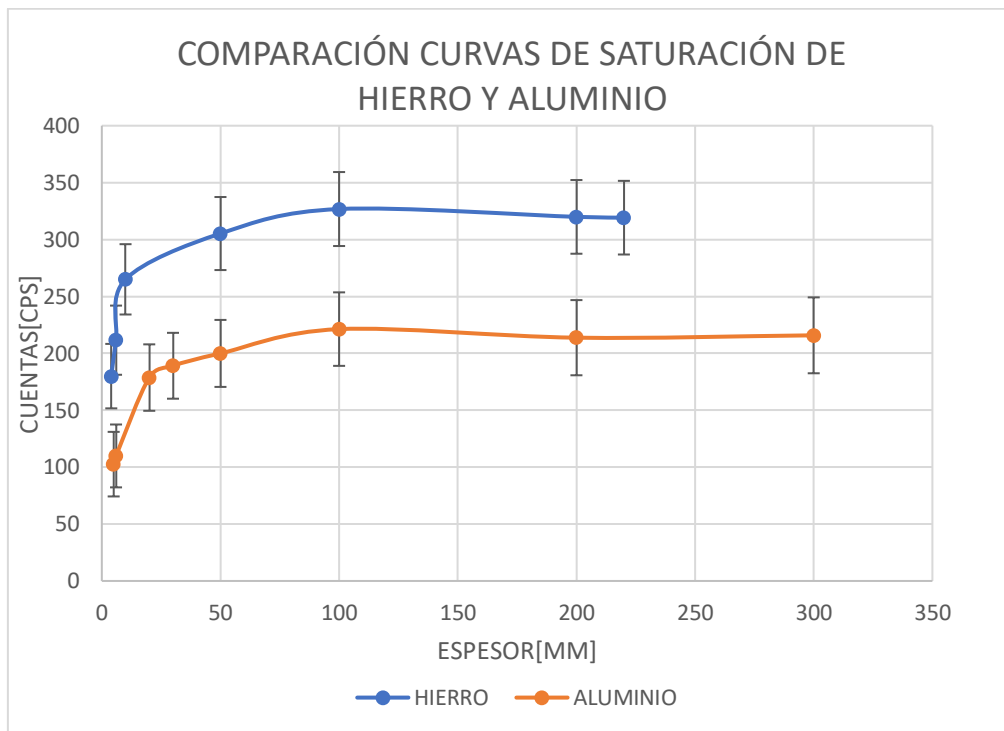
-Detector NaI 3"x 3"

-Fuente de  $^{137}\text{Co}$  superficial de 3mm de diámetro,  $A_{\text{cobalto}}=183.9 \text{ KBq}$

-Muestras de Fe y Al de espesor variable de base circular de diámetro  $D=4.68 \text{ cm}$  y espesor variable.



**Figura 14. 1:** Esquema de galga vertical simulada, acotada en cm, detector sobre la fuente y muestra debajo de la fuente.



**figura 14.2:** Comparación curvas de dispersión de una galga vertical, para diferentes muestras de hierro y aluminio.

## 15.Presupuesto

El presupuesto de este trabajo se cuantifica por los siguientes factores, costes de recursos humanos, costes de recursos informáticos y documentación. Dado que este proyecto trata de un estudio previo al diseño final de una galga de retrodispersión, no se cuantifica el coste de fabricación.

### 15.1 Costes asociados a recursos humanos

Se tiene en cuenta las horas de trabajo que se dedican al proyecto, como las horas de redacción y de búsqueda de información.

Descripción	Precio unitario [€/ hora]	Horas	Precio total [€]
Ingeniero junior	10	300	3000

**Figura 15.1:** Costes de recursos humanos

### 15.2 Costes de recursos materiales

En este trabajo se han llevado a cabo muchas simulaciones con el código PENELOPE, este programa es gratuito, pero los equipos para utilizar este programa no lo son, por lo tanto, se tendrá en cuenta las horas de uso de las simulaciones, y además las horas de redacción y búsqueda de información por ordenador.

Descripción	Precio unitario [€/ hora]	Horas	Precio total [€]
Coste uso del ordenador	0.4	300	120

**Figura 15.2:** Costes de recursos informáticos y documentación.

### 15.3 Costes totales

Los costes totales se obtienen sumando todos los tipos de costes, como los de recursos humanos y los recursos informáticos y documentación.

Concepto	Facturación [€]
Recursos humanos	3000
Recursos informáticos y documentación	120
Total sin IVA	3120
IVA (21%)	655.2
<b>TOTAL</b>	<b>3775.2</b>

**Tabla 15.3** Desglose de costes y coste total del trabajo .

## 16. Impacto ambiental

Los posibles efectos negativos que puedan causar las galgas de retrodispersión por el hecho de utilizar fuentes radiactivas se reducen debido a que existen maneras de proceder, los operarios de galgas portátiles deben recibir un entrenamiento inicial de seguridad para obtener una certificación del uso de estos dispositivos.

El límite de dosis a la que puede estar expuesto un trabajador es de aproximadamente es de 5000milirem al año, aunque en realidad, un trabajador típicamente recibe menos de 100milirem en un año, para poner esto en perspectiva, la dosis media que recibe un ciudadano americano es de 360milirem de radiación de fondo durante el mismo periodo de tiempo. [13]

Las fuentes radiactivas están controladas por el NRC (nuclear regulatory comission) a la que se adhieren 32 países como España, esta organización y las regulaciones estatales exigen a los licenciarios asegurar las fuentes de robos y accesos no autorizados, Cualquier tipo de robo o pérdida tiene que ser informado, por lo tanto, el peligro de utilizar indebidamente esta fuente queda limitada.

Si hay algún accidente con la galga, se debe verificar que esta no es peligrosa utilizando un dosímetro, para confirmar que el envoltorio de la fuente no tiene fugas, y poner inmediatamente la galga en un contenedor adecuado de plomo. En caso de que la galga haya sido dañada, se debe medir la dosis y poner señales de área de control, un test de fuga indicará donde la fuente ha sido dañada, dichas galgas no se volverán a utilizar.

Cuando el trabajo de medición de las galgas portátiles acaba, se ha de utilizar un dosímetro para asegurar que la fuente está completamente cerrada, y además se ha de almacenar en un lugar seguro, y informar que ha vuelto.

Tan pronto como la galga o la fuente dejan de ser útiles, debe ser devuelta al productor o al proveedor, aquellas sustancias radiactivas que se envíen a depósitos deben ser apropiadamente empaquetadas y transportadas en acuerdo con la IAEA (Regulations for the Safe Transport of Radiactive Material). [14]

Finalmente, el impacto ambiental causado durante este proyecto ha sido debido al uso del ordenador ya que se gasta mucha energía eléctrica ya que el tiempo de simulación y redacción es largo. Los experimentos llevados a cabo suponen un impacto nulo ya que se lleva a cabo en un laboratorio que está declarado como instalación radiactiva y el personal tiene el carnet de supervisor de instalaciones radiactivas lo que hace que haya poco riesgo.

## Conclusiones

En este proyecto se ha estudiado como encontrar la mejor configuración de una galga de retrodispersión para que sea más sensible, para ello se ha tenido que hacer diversas simulaciones con diferentes orientaciones del detector con el programa PENELOPE, una vez realizadas se concluye que la posición más óptima es aquella en la que el detector se encuentra más cerca de la muestra y además más cerca del área del rayo colimado.

Cabe destacar que las simulaciones se han tenido que simplificar ya que el equipo informático utilizado es doméstico y el tiempo de simulación para obtener un espectro con buena resolución es alto.

Además de obtener una galga eficiente también se verifican otros fenómenos como la variación de número de cuentas para distintas muestras, en este caso hierro y aluminio, con una galga sin barrera. Para esto se ha llevado a cabo diferentes simulaciones con menos simplificaciones dado que la intención es demostrar que en las de hierro llegan más cuentas dispersadas que en las de aluminio debido a su densidad.

Otro fenómeno que se comprueba es que para una galga de retrodispersión inclinada con la configuración óptima encontrada, llegan más cuentas de saturación del  $^{60}\text{Co}$  que de  $^{137}\text{Cs}$  debido a su energía, además obteniendo las curvas de saturación normalizadas se determina que el espesor de saturación del  $^{60}\text{Co}$  es mayor al de  $^{137}\text{Cs}$ , 113.5 mm y 102.5 mm respectivamente.

En cuanto al impacto ambiental, el uso de las galgas está tan regulado, que los daños que puedan causar se reducen al mínimo, por lo tanto, a pesar de que se utilizan fuentes radiactivas gamma, estas no suponen ningún problema para los operarios, exceptuando accidentes.

Finalmente, para obtener futuras mejoras en la configuración de la galga de retrodispersión inclinada se debe variar otros parámetros, como por ejemplo la orientación de la fuente, o la distancia entre la muestra y el detector, estas variaciones podrían hacer que la galga sea más sensible en un futuro proyecto.



## Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al director de este trabajo al, Dr. Alfredo de Blas del Hoyo, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor.

.

## Bibliografia

### Referencias bibliográficas.

- [1] GEIR ANTON JOHANSEN, PETER JACKSON. Radioisotope *gauges for industrial process measurements*. WILEY INTERACCIÓN DE LOS FOTONES CON LA MATERIA .WILEY . 2004..p 47-52 .
- [2] XAVIER ORTEGA ARAMBURU, JAUME JORBA BISBAL. *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos II*. p. 216
- [3] GEIR ANTON JOHANSEN, PETER JACKSON. Radioisotope *gauges for industrial process measurements*. WILEY INTERACCIÓN DE LOS FOTONES CON LA MATERIA .WILEY . 2004.p. 232-233.
- [4] XAVIER ORTEGA ARAMBURU, JAUME JORBA BISBAL. *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos II*. p. 219
- [5] XAVIER ORTEGA ARAMBURU, JAUME JORBA BISBAL. *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos II*. p. 214
- [6] RUBEN WAINCHENKER *Cálculo de Dosis Absorbida en Radioterapia: Efecto Compton*. Figura 1.
- [7] [http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/archivos/guiones\\_virtual/Tiempos\\_Vida/Detectores.htm](http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/archivos/guiones_virtual/Tiempos_Vida/Detectores.htm), figura 2.
- [8] XAVIER ORTEGA ARAMBURU, JAUME JORBA BISBAL. *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos II*. p. 219
- [9] <https://es.wikipedia.org/wiki/Cobalto-60>
- [10] RAQUEL GONZÁLEZ DE ORDUÑA MARTÍN. *Caracterización de detectores coplanares de CdZnTe para radiación gamma* Universidad Autónoma de Madrid. Madrid 2007. P. 17 ,fig 1.5
- [11] RAQUEL GONZÁLEZ DE ORDUÑA MARTÍN. *Caracterización de detectores coplanares de CdZnTe para radiación gamma* Universidad Autónoma de Madrid. Madrid 2007. P. 18 ,fig 1.7.
- [12] Curso de SUPERVISORES de instalaciones radiactivas (IR) MÓDULO BÁSICO EMA 4: DETECCIÓN Y MEDIDA DE LA RADIACIÓN .CIEMAT..P.15-16
- [13] *Portable Nuclear Gauge - Media Information*, [https://www.apnga.com/media\\_info.pdf](https://www.apnga.com/media_info.pdf).

- [14] *MANUAL ON NUCLEAR GAUGES IAEA*, VIENNA, 1996 IAEA-PRSM-3 (Rev.1)  
[Phttps://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/28/027/28027981.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/027/28027981.pdf)..P.  
36
- [15] GORDON GILMORE *"Practical Gamma-Ray Spectrometry"*. 2a Edició. Wiley and Sons. 2008.

## **Bibliografía complementaria**

ROBIN P. GARDNER. RALPH L. ELY, Jr. *Radiaisotope measurement applications in engineering*.

FRANCESC SALVAT. PENELOPE-2014 A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Workshop Barcelona, Spain 29 June-3 July 2015. Facultat de Física (ECM) Universitat de Barcelona.